第40卷 第3期
2023年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

退耕还林(草)工程实施前后黄河中游生境质量时空变化分析

陈 实[1]， 黄银兰[1]， 金云翔[2]

(1. 池州学院地理与规划学院,池州学院自然资源遥感应用研究中心,安徽 池州 247000;
2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘 要: 科学认识生境质量的时空变化特征及其发展趋势,对黄河中游生态保护修复以及高质量发展具有重要的现实意义。本文基于1992—2020年欧洲航空航天局逐年的土地覆盖数据,采用InVEST模型估算生境质量,运用Sen+MK检验和Hurst指数分析方法,探究了退耕还林(草)工程实施前后黄河中游的生境质量时空变化和发展趋势。研究结果表明:(1)整体上看,29 a来黄河中游地区生境质量整体较好,平均生境质量指数为0.652,但呈现小幅下降趋势(每10 a下降0.004),从局部上看,退耕还林(草)区生境质量呈现上升趋势(每10 a上升0.174),其中,2011—2020年上升趋势最为显著,10 a增加了0.656;(2)2001—2020年黄河中游地区生境质量发生时空变化的趋势类型以明显降低为主,但从不同时间段的发展来看,2011—2020年较2001—2010年生境质量向好发展的面积增多,体现在退耕还林(草)区的生境质量上升;(3)未来黄河中游地区生境质量发生时空变化趋势类型以明显降低和明显上升为主,且可持续性较强,明显降低区主要分布在汾渭平原以及城市集中发展区域,明显上升区主要位于山西省、陕西省以及内蒙古自治区三地交界片区。

关键词: 生境质量; InVEST模型; 退耕还林; CCI-LC; 黄河流域

黄河流域是中国重要的生态屏障,对维护区域生态安全具有十分重要的作用[1]。2019年9月18日,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出"黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大战略"[2],在大力推进生态保护修复的黄河流域中游显得尤为重要[3],随着黄河中游人类改造自然界的规模和力度不断增强,土地利用强度及方式的时空变化使得生态系统结构与格局改变,对生境要素、生境区域之间的物质能量循环产生影响[4-5],即改变了生境质量。退耕还林(草)工程已实施二十几年,黄河中游土地利用转变格局明显[6],从而改变了区域生境质量[7-8]。因此,科学认识生境质量的时空变化特征及其发展趋势,对黄河中游生态保护修复治理以及高质量发展具有重要的现实意义。

近年来,学者们广泛应用生态系统服务评估与权衡模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)中的生境质量模块(Habitat Quality, HQ)来估算生境质量,并具有较好的效果[9-11]。土地利用/覆盖数据是生境质量测算的核心数据,中科院资源环境科学数据中心可提供5 a时间尺度的数据(分辨率30 m)[12-14],国家基础地理信息中心能够提供10 a时间尺度的地表覆被产品(分辨率30 m)[15],学者们也可根据研究需要,下载处理多时期遥感影像,采用目视解译或面向对象分类等方法解译出各时期的土地利用类型[4,16],在现有土地利用类型数据基础上,运用CA-Markov模型模拟预测未来时期的土地利用类型[17-18]。在年际时间尺度上,可采用NASA提供的MODIS MCD12Q1(分辨率500 m)土地利用/覆盖产品数据[19]。然而,中高空间分辨率土地利用/覆盖数据时间间隔较长,时间序列数据难以获取,满足时序条件的土地利用/覆盖数据

收稿日期: 2022-09-22; **修订日期:** 2022-10-27
基金项目: 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2020A0761);池州学院引进博士科研启动基金项目(2022YJRC001);池州学院校级国家基金培育项目(CZ2021GP02)
作者简介: 陈实(1987-),男,博士,讲师,主要从事资源与环境遥感研究. E-mail: shic11@126.com
通讯作者: 金云翔. E-mail: jinyunxiang@caas.cn

空间分辨率相对较低,数据应用上限制了长时间序列生境质量时空变化规律分析。而由欧洲空间局(European Space Agency, ESA)制备的(Climate Change Initiative-land Cover,CCI-LC)地表覆盖类型产品,分类精细、时间序列最长(1992—2020年)、空间分辨率较高(分辨率300 m)[20],在探究退耕还林(草)工程实施前后黄河中游生境质量时空变化特征具有明显的优势。

学者们通过生境质量时空变化分析,在土地整治和生态保护恢复等监测评价方面具有较好的应用。如在土地整治前、中、后3个时期,生境质量经历了先下降后上升的过程[21],农牧交错带在开展一系列生态保护和生态恢复工程后,区域生境质量总体趋于好转[22],退耕还林(草)政策实施可促使生境质量转好[23]。同时,不合理的人类活动会导致生境质量退化,如在黄河湿地自然保护区,建设用地面积的增加和湿地的波动减少是导致生境质量退化的主要原因[24],黄河三角洲高效生态经济区的土地利用程度与生境质量呈显著负相关性,且相关性不断增强[25],人类活动与生境质量之间存在显著的空间依赖性,二者呈现显著的空间负相关[26]。黄河中游地区生态环境脆弱,经济与生态矛盾突出[27],在重点实施退耕还林(草)生态恢复工程背景下,29 a年来黄河中游地区及其退耕还林(草)区的生境质量年际变化特征和时空变化趋势如何?哪些地区的生境质量具备上升潜力,哪些地区未来需要重点关注?这些问题尚不明确,需要结合遥感长时序数据与地理信息空间分析技术进行定量研究与评价。

鉴于此,本研究在退耕还林(草)工程实施前后,基于1992—2020年逐年土地覆盖数据,借助InVEST模型估算生境质量,运用Theil-Sen Median趋势分析方法,揭示黄河中游生境质量时空演变特征,并采用Hurst指数探究未来生境质量的发展持续性。研究结果可为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

1　数据和方法

1.1　研究区概况

黄河流域中游地区是指内蒙古自治区呼和浩特市的河口镇至河南省郑州市的桃花峪区间[28],地跨103°53′~113°41′E,33°39′~40°35′N,河段总长1234 km,流域面积为3.44×10^5 km^2,海拔在0~3929 m,地势比较复杂,囊括沟壑纵横的黄土丘陵和峁梁交错的黄土高原(图1)。该区处于我国半湿润区向干旱区过渡地带,降水具有很强的空间变异性,空间格局由东南向西北、由山地向平地递减,降水集中在6—9月,多以暴雨为主,水土流失严重。为了改善生态环境,黄河中游退耕还林(草)项目大规模实施,因地制宜的进行植树造林、恢复植被,生态环境得到较好的恢复,土地利用/覆盖状况发生了巨大变化[29]。

1.2　数据来源与处理

文中使用的土地覆盖数据来源于欧洲航空航天局研发的逐年土地覆盖数据集,其是目前时间序列最长(1992—2020年)、空间分辨率较高(300 m×

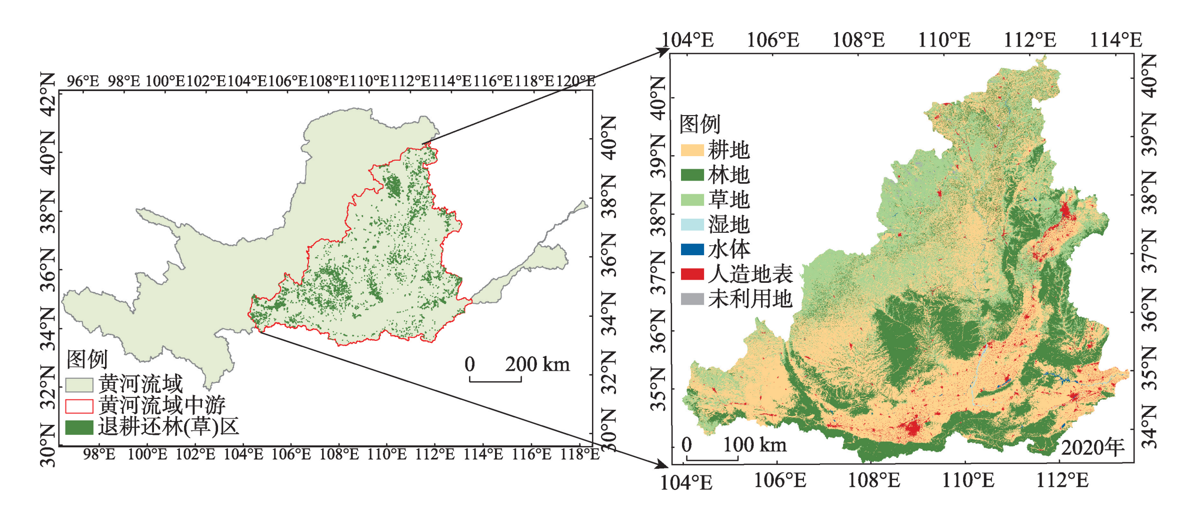


图1　研究区示意图

Fig. 1　Location of study area

300 m)的全球土地覆盖产品,非常适合基于土地覆盖变化的长时间序列、大范围的时空变化研究[30]。从欧空局网站(http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/)下载全球的NetCDF4格式数据,然后利用QGIS软件处理成tif格式数据,坐标系统为WGS1984,最后通过裁剪处理得到研究区1992—2020年逐年土地覆盖数据。该数据集总体精度为71.98%,Kappa系数为0.650[31]。该产品依照联合国粮农组织开发的土地覆盖分类系统标准分为22个大类,36个精细分类。为了便于黄河中游地区生境质量的评估,基于精细分类的36个类型,依据CCI-LC土地利用/覆盖类型重分类规则归并为耕地、林地、草地、湿地、水体、人类造地表和未利用地7类[32],得到黄河中游地区的七大类土地覆盖类型。在本研究中所涉及的退耕还林(草)区是2000—2020年由耕地转化为林地或草地的栅格空间分布区。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST模型 利用1992—2020年土地利用/覆盖类型栅格数据,依托InVEST模型中的Habitat Quality模块计算每年的生境质量指数[33]。首先,确定生境威胁因子敏感度和外界威胁强度,计算出生境质量的退化程度,然后设置半饱和常数(k)得到生境质量[34]。具体公式如下:

$$i_{rxy}=\begin{cases}1-\left(\dfrac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right) & (\text{线性衰退})\\ \exp\left[-\left(\dfrac{2.99}{d_{r\max}}\right)\times d_{xy}\right] & (\text{指数衰退})\end{cases} \quad (1)$$

$$D_{xj}=\sum_{1}^{r}\sum_{1}^{y}\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^{n}\omega_r}\times r_y\times i_{rxy}\times\beta_x\times S_{jr} \quad (2)$$

$$Q_{xj}=H_j\times\left[1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)\right] \quad (3)$$

式中:i_{rxy}代表栅格y中的威胁因子r对栅格x的影响;d_{xy}代表栅格x和y之间的距离;$d_{r\max}$代表威胁因子r的影响范围;D_{xj}表示生境在胁迫压力下表现出退化的程度,为生境退化度指数;ω_r、r_y、β_x、S_{jr}依次代表不同威胁因子的权重、威胁因子强度、生境抗干扰水平、不同生境对不同威胁因子的相对敏感程度;生境质量Q_{xj}是土地利用/覆盖类型j中栅格x的生境质量值;H_j代表土地利用/覆盖类型j的生境适应比重;z为尺度常数,取值2.5;k是半饱和常数,在模型中根据栅格数据空间分辨率(300 m)来自定义半饱和常数k。计算出的Q_{xj}在0~1之间,越接近1生境质量越好。

综合考虑研究区状况、已有学者的相关研究以及专家咨询,选择耕地、人造地表、未利用地作为胁迫因子。根据每个胁迫因子设置最大胁迫距离、权重值和空间衰退类型;用于计算的7个土地利用/覆盖类型对应胁迫因子需设置敏感度参数,包括各土地利用/覆盖类型的生境适宜度和土地利用/覆盖类型对胁迫因子的敏感度[35]。参考InVEST模型用户手册、学者们的研究成果以及专家咨询结果进行参数设置[1],具体如表1和表2所示。

表1 各景观类型对生境威胁因子的敏感度

Tab. 1 Sensitivity of landscape types to habitat threat factors

土地利用/覆盖类型	生境适宜度	胁迫因子		
		耕地	人造地表	未利用地
耕地	0.3	0	0.8	0.4
林地	1	0.6	0.4	0.2
草地	1	0.8	0.6	0.6
湿地	0.9	0.6	0.7	0.4
水体	0.7	0.5	0.4	0.2
人造地表	0	0	0	0.1
未利用地	0.6	0.6	0.4	0

表2 威胁因子及其参数设置

Tab. 2 Threat factors and its parameter setting

威胁因子	最大胁迫距离	权重	空间衰退类型
耕地	6	0.6	线性
人造地表	9	0.9	指数
未利用地	4	0.4	线性

1.3.2 Sen+MK趋势分析法 Theil-Sen Median趋势分析是一种稳定且受数据异常值影响较小的计算方法,为了判断不同时间点上收集到的数据趋势,通常结合具有正态分布特征变量的非参数Mann-Kendall检验方法使用,已成为时间序列变化分析当中重要的研究方法。其对数据误差的干扰具有较强的规避力,不需要数据服从一定的分布,并且为显著性水平检验提供了坚实的统计理论基础,使结果更加科学可靠[36-37]。Theil-Sen Median趋势计算公式为:

$$S_X=\mathrm{Median}\left(\frac{X_j-X_i}{j-i}\right) \quad (4)$$

式中：S_X 表示生境质量指数变化趋势，当 $S_X>0$ 时，反映生境质量(X)呈现增长的趋势，反之则反映生境质量(X)呈现下降的趋势。

Mann-Kendall的检验方法是用来判断变化趋势的显著性，可适用于不具有正态分布特征变量的趋势分析。计算公式如下：

设定$\{X_i\}$，$i=1992, 1993, \cdots, 2020$

$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S>0\\ 0, & S=0\\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S<0\end{cases} \quad 其中，S=\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{i=j+1}^{n}\operatorname{sgn}(X_j-X_i) \quad (5)$$

$$\operatorname{sgn}(X_j-X_i)=\begin{cases}1, & X_j-X_i\\ 0, & X_j-X_i\\ -1, & X_j-X_i\end{cases}, \quad s(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{19} \quad (6)$$

式中：X_i 和 X_j 分别表示栅格第 i 年和第 j 年的生境质量(X)值；n 表示时间序列的长度(29 a)；sgn为计算符号函数；统计量 Z 的取值范围在正负无穷之间。在给定显著性水平 α(一般取0.05)下，当 $|Z|>u_{1-\alpha/2}$ 时，表示研究序列在 α(0.05)水平上存在显著变化[29]。

结合Sen变化趋势程度和MK检验结果，对生境质量变化趋势类型分类，当Sen≥0.0005且MK≥1.96时，表征为生境质量明显上升；当Sen≤−0.0005且MK≤−1.96时，表征为生境质量明显降低；当−0.0005<Sen<0.0005且−1.96<MK<1.96时，表征为生境质量稳定不变；当Sen≥0.0005且−1.96<MK<1.96时，表征为生境质量轻微上升；当Sen≤−0.0005且−1.96<MK<1.96时，表征为生境质量轻微降低。

1.3.3 *Hurst指数发展趋势预测*　Hurst指数用于判断时序数据是否具有可持续性或反持续性，计算方法，详见文献[38]。Hurst>0.5表示生境质量发展趋势与过去趋势是一致的，且Hurst值越接近于1，可持续性越强。Hurst<0.5表示生境质量发展趋势与过去趋势是不一致的，且Hurst值越接近0，反持续性越强。Hurst=0.5表示生境质量变化为随机序列，不存在长期相关性。

为了清晰揭示黄河中游生境质量的可持续性趋势，本文综合利用Sen趋势、MK检验结果和Hurst指数对生境质量发展趋势进行分类。当Sen≥0.0005、MK≥1.96且Hurst>0.5(Hurst<0.5)时，表示未来生境质量发展表现为可持续性(反持续性)上升趋势；当Sen≤−0.0005、MK≤−1.96且Hurst>0.5(Hurst<0.5)时，表示未来生境质量发展表现为可持续性(反持续性)下降趋势；当−0.0005<Sen<0.0005、−1.96<MK<1.96且Hurst>0.5(Hurst<0.5)时，表示无法确定未来生境质量发展趋势。

2　结果与分析

2.1　黄河中游生境质量年际变化特征

从整个黄河中游地区来看，1992—2020年生境质量在0.646~0.657之间发生微弱的波动减少，每10 a减少0.004($P<0.001$)。在1992—2000年生境质量在0.654~0.657之间波动减小，每10 a减少0.003($P<0.001$)，在2001—2010年生境质量减速程度略有加强，每10 a减少0.005($P<0.001$)；而在2011—2020年生境质量变化差异性不显著($P<0.5$)，在此10 a间生境质量下降趋势缓解，但波动变化较大(图2a)。从黄河中游退耕还林(草)区分析结果来看(图2b)，1992—2020年生境质量呈现增加的趋势，每10 a增加0.174($P<0.001$)。在1992—2000年黄河中游退耕还林(草)区生境质量在0.304~0.307之间波动减小，每10 a减少为0.010($P<0.001$)，而从2001年该地区退耕还林(草)工程的大规模实施，2001—2010年生境质量明显提升，在0.308~0.402之间迅速增加，其在每10 a增加0.122($P<0.001$)；2011—2020年生境质量显著提升，由0.451骤增到0.966，增速达到0.656($P<0.05$)。

2.2　黄河中游生境质量时空变化趋势

根据黄河中游及退耕还林(草)区的生境质量年际变化规律(图2)，选取研究区生境质量变化较为明显的时间段(2001—2020年)，开展黄河中游生境质量时空变化分析。从2001年、2011年和2020年3个时期来探究黄河中游不同时期生境质量等级空间分布，将生境质量指数按照0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1划分为差、较差、一般、良好和优5个等级标准[35]。

黄河中游生境质量的空间格局以优和较差等级为主，优等级主要分布在太行山、吕梁山、秦岭北部等区域，较差等级主要分布在关中盆地、渭河平原等区域。然而，随着社会经济快速发展，生境质量等级为差的范围在逐渐辐射扩散(图3a~图3c)。

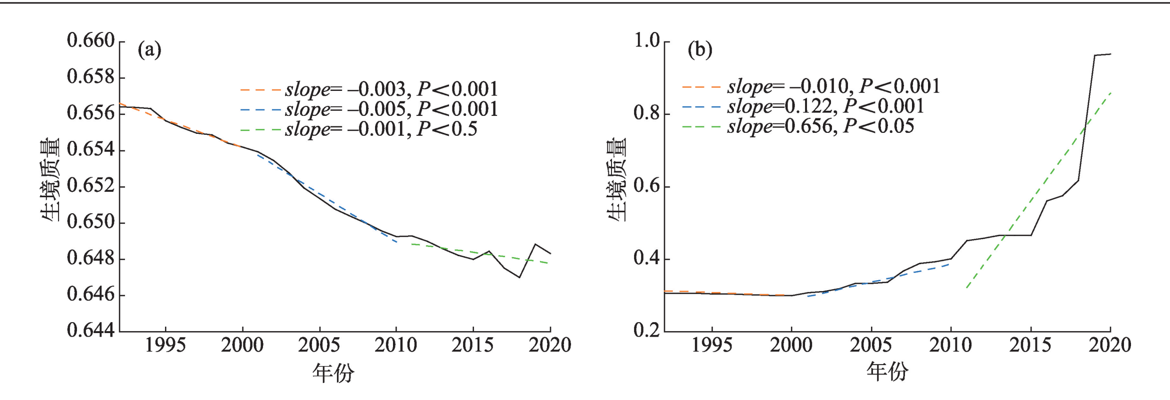


图2 1992—2020年黄河中游(a)及退耕还林(草)区(b)生境质量变化趋势

Fig. 2 Change trend of habitat quality in the middle reaches of the Yellow River (a) and the Grain for Green Project area (b) from 1992 to 2020

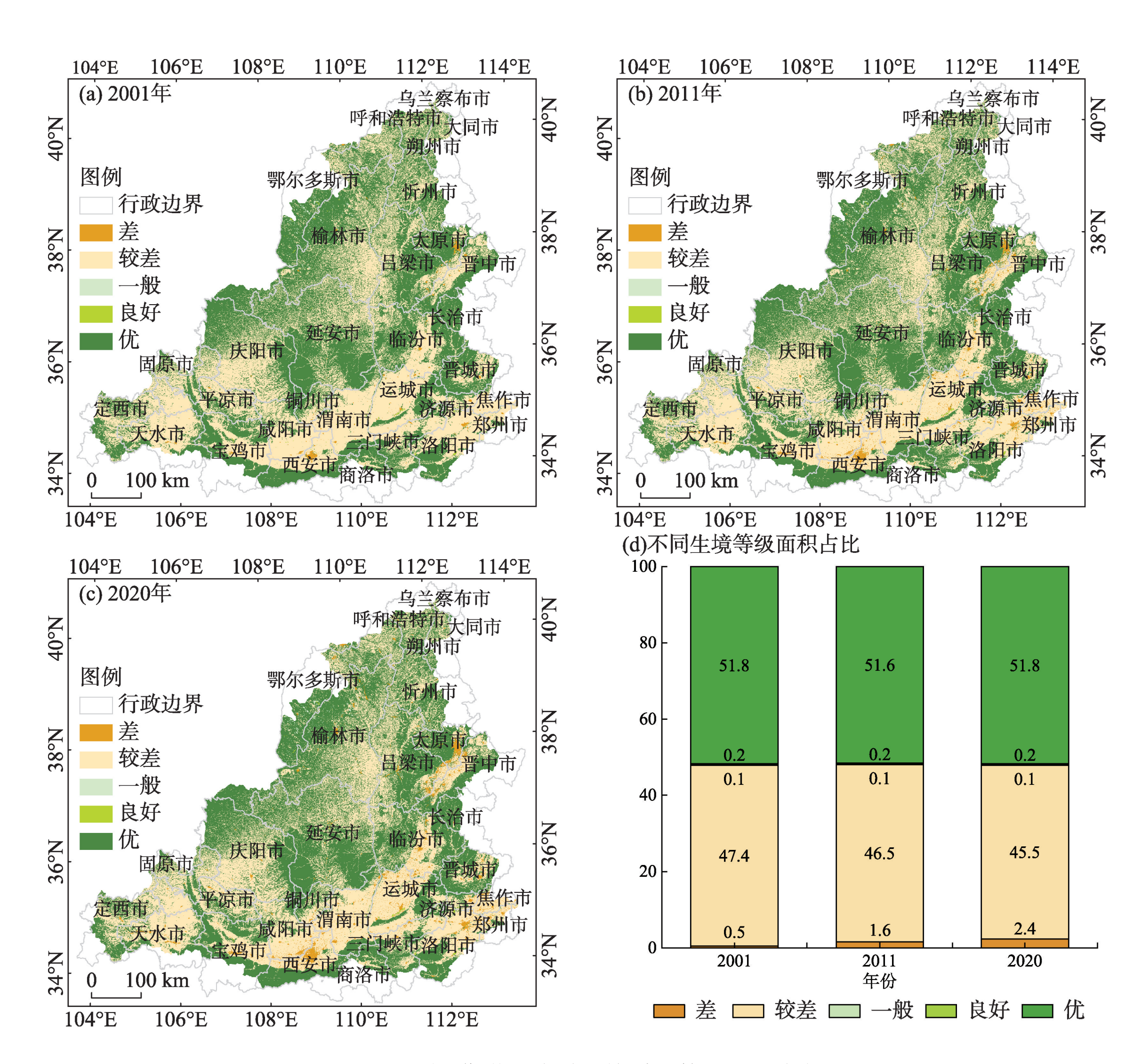


图3 不同时期黄河中游生境质量等级时空分布

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of habitat quality grades in the middle reaches of the Yellow River at different periods

从研究区生境质量等级在不同时间段的面积占比来看，生境质量等级为优的面积占比均超过51%，良好和一般等级保持稳定，而生境质量的较差和差等级变化明显，其中较差等级面积占比由47.4%下降到45.5%，面积减少约2%，差等级面积则增加了近2%(图3d)。

从2001—2020年、2001—2010年、2011—2020年3个时间段，分析黄河中游生境质量时空变化趋

势。在整个黄河中游地区,2001—2020年有37203个像元的生境质量发生了变化,降低和上升的面积分别占变化面积的81.14%和18.86%,其中明显降低和明显上升的面积分别占80.71%和12.19%(图4a,表3);2001—2010年存在43865个像元的生境质量发生了变化,降低和上升的面积分别占变化面积的86.76%和13.24%,其中明显降低和明显上升的面积分别占84.56%和8.48%(图4b,表3);2011—2020

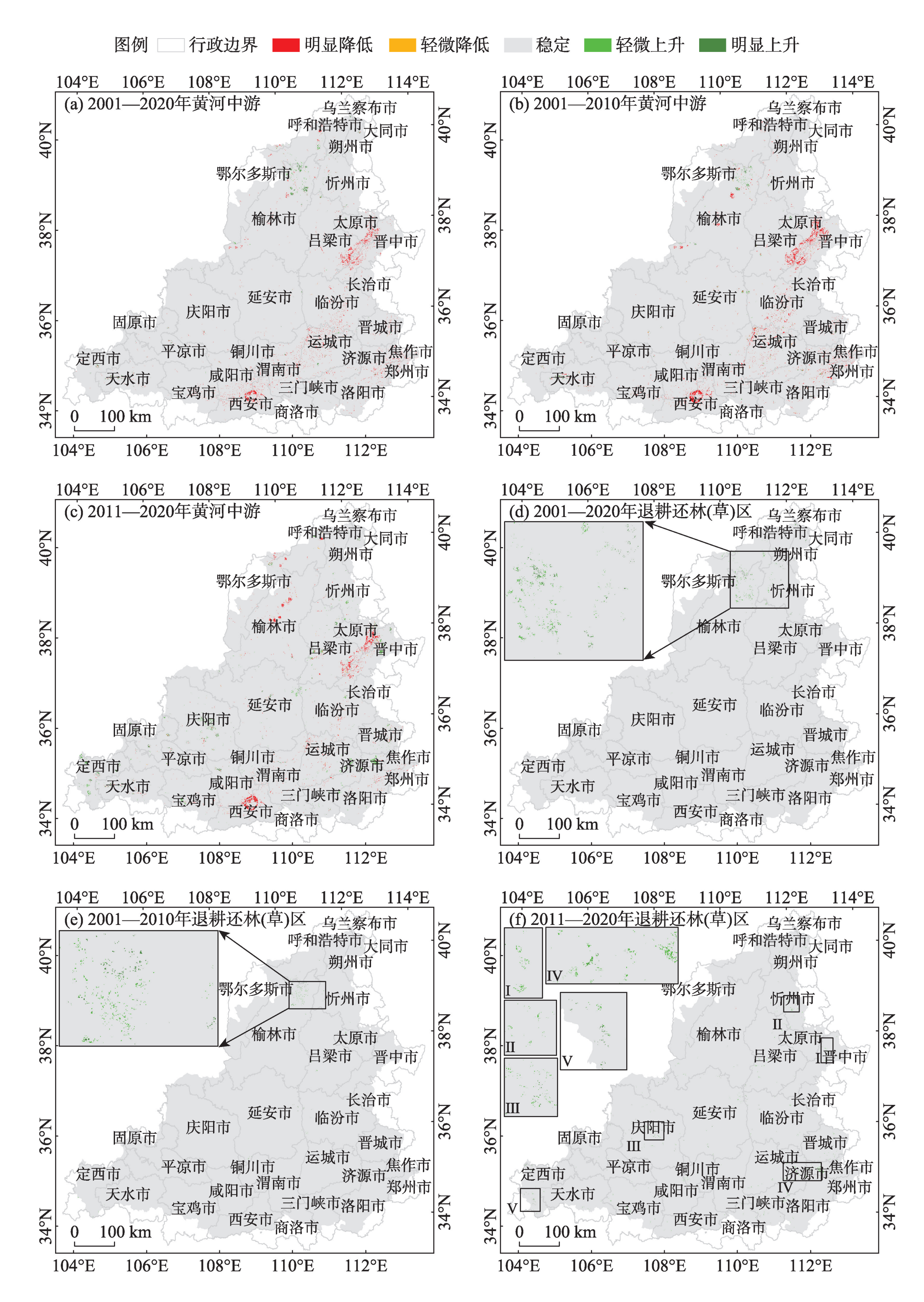


图4　生境质量变化类型空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of variation types of habitat quality

表3 各时间段黄河中游生境质量变化趋势类型像元个数及百分比

Tab. 3 The number and percentage of pixels by type of habitat quality change trend in the middle reaches of the Yellow River during each period

变化类型	2001—2020年		2001—2010年		2011—2020年	
	变化像元数/个	百分比%	变化像元数/个	百分比%	变化像元数/个	百分比%
明显降低	30026	80.71	37097	84.56	25391	57.49
轻微降低	161	0.43	964	2.20	931	2.11
轻微上升	2482	6.67	2086	4.76	10588	23.97
明显上升	4534	12.19	3718	8.48	7258	16.43
总计	37203	100.00	43865	100.00	44168	100.00

年，研究区有44168个像元发生了变化，生境质量呈现上升趋势的面积较2001—2010年有所增加，而呈现降低趋势的面积较2001—2010年有所减少，分别占变化面积的59.60%和40.40%，其中轻微上升和明显上升的面积大幅度增加，分别占23.97%和16.43%，明显降低的面积骤减至57.49%(图4c，表3)。

从空间格局来看，2001—2010年生境质量明显降低的区域主要分布在汾渭平原快速城镇化发展区，如陕西西安市、陕西太原市片区，生境质量明显上升的区域主要分布在陕西省榆林市东北部、延安市东部局部、甘肃省天水市西部局部，以及山西省忻州市和太原市西部局部等地区；到2011—2020年，生境质量明显降低的区域有所缩减，仍分布在汾渭平原快速城镇化发展区，而生境质量明显上升的区域呈现多点开花态势，如陕西省延安市局部、甘肃省庆阳市和定西市局部、山西省长治市东部局部以及河南省济源市局部等地区。总体上，2001—2020年黄河中游地区生境质量降低区域主要分布在快速城镇化发展地区，生境质量上升主要分布在生态工程实施的重点地区。

在黄河中游退耕还林(草)区，2001—2020年有3248个像元的生境质量发生了变化，表现为生境质量上升，其中轻微上升和明显上升的面积分别占60.65%和39.35%(图4d，表4)；2001—2010年存在1452个像元的生境质量发生了变化，主要表现为生境质量上升，其中轻微上升和明显上升的面积分别占65.01%和34.71%(图4e，表4)；2011—2020年，研究区有4804个像元发生了变化，生境质量呈现上升趋势的面积较2001—2010年有明显的增加，生境质量轻微上升(80.50%)比生境质量明显上升的面积占比要大，同时还存在很小比例的明显降低像元，面积占比仅为0.52%(图4f，表4)。从空间格局来看，2001—2010年生境质量上升的区域主要分布在陕西省榆林市东北部；2011—2020年，生境质量上升的区域呈分散式增加，主要分布在山西省忻州市和晋中市、河南省济源市、甘肃省庆阳市和定西市。总体来看，2001—2020年退耕还林(草)区生境质量上升区域主要分布在陕西省榆林市东北部和山西省忻州市中西部。

2.3 黄河中游生境质量变化可持续性分析

黄河中游地区生境质量的Hurst指数范围为0.318~0.760(均值为0.685)，反持续性(Hurst<0.5)占

表4 各时间段黄河中游退耕还林(草)区生境质量变化趋势类型像元个数及百分比

Tab. 4 The number and percentage of pixels by type of habitat quality change trend in the area of the Grain for Green Project in the middle reaches of the Yellow River during each period

变化类型	2001—2020年		2001—2010年		2011—2020年	
	变化像元数/个	百分比%	变化像元数/个	百分比%	变化像元数/个	百分比%
明显降低	0	0	4	0.28	25	0.52
轻微降低	0	0	0	0	0	0
轻微上升	1970	60.65	944	65.01	3867	80.50
明显上升	1278	39.35	504	34.71	912	18.98
总计	3248	100.00	1452	100.00	4804	100.00

比仅0.88%,可持续性(Hurst>0.5)占比高达99.12%。结合Sen趋势和MK检验的地理空间分析来看,黄河中游生境质量在维持2001—2020年的变化趋势下,以持续性降低和持续性上升发展为主,生境质量可持续性降低趋势区所覆盖区域较大,主要分布于汾渭平原以及城市集中发展区域,生境质量可持续性上升趋势区主要位于陕西省的榆林市北部、山西省忻州市西部局部、甘肃省的天水市和平凉市局部(图5a)。

在黄河中游退耕还林(草)区,生境质量的Hurst指数范围为0.483~0.760(均值为0.644),可持续性(Hurst>0.5)占比达到了99.09%。未来年份黄河中游退耕还林(草)区生境质量将维持2001—2020年的变化趋势,体现在生境质量可持续性上升,主要分布在陕西省(榆林市)、山西省(忻州市)以及内蒙古自治区(乌兰察布市、呼和浩特市和鄂尔多斯市)三地交界片区(图5b)。

3　讨 论

在InVEST模型估算中,草地和林地的生境适宜度高于人造地表和耕地,随着退耕还林(草)生态工程实施,耕地向林地或草地转换的面积逐年增加,黄河中游生境质量年际变化伴随着耕地向林地和草地面积变化而变化。从黄河中游区2001—2010年和2011—2020年两个时间段的土地利用/覆盖类型转移情况来看,2001—2010年耕地仅有3836个像元向林地(621个像元)和草地(3215个像元)转移(图6a),以致退耕还林(草)区2001—2010年生境质量上升缓慢,而在2011—2020年耕地向林地(3175个像元)和草地(18430个像元)转移的像元增加到21605个(图6b),在此阶段黄河流域退耕还林(草)区的生境质量显著上升。

考虑到黄河中游生境质量年际变化规律,以及退耕还林(草)生态工程全面实施的时间节点[39],划分了2001—2020年、2001—2010年和2011—2020年时间断面,从整体(黄河中游地区)和局部(黄河中游退耕还林(草)区)两个尺度,在退耕还林(草)工程实施前后,探究生境质量时空变化特征。在整体上,黄河中游地区生境质量总体较好,但在年际变化上表现为轻微的波动下降,这与杨洁等[1]研究黄河流域的平均生境质量指数0.631,整体呈现小幅下降趋势的结果相近。在局部上,黄河中游退耕还林(草)区生境质量在年际变化上呈现明显上升的态势,这与Guo等[40]探究呼伦贝尔—包头—鄂尔多斯—榆林城市群和太原城市群的生态系统服务价值所呈现的上升趋势较为一致。

从不同空间尺度研究均可发现,由耕地转为林地、草地的区域,其生境质量上升发展的可持续性较好,黄河中游区计划和正在实施的退耕还林(草)生态工程地区具备生境质量上升潜力[28],生境质量上升地区主要位于榆林、朔州等生态工程实施的重点地区,这些地区本身属于经济欠发达的山区,受人类活动干扰较小,大面积的撂荒土地增加了植被覆盖率[41-42],退耕还林(草)、生态文明建设等政策措施提高了生境质量[43]。在研究区城镇原建成区的

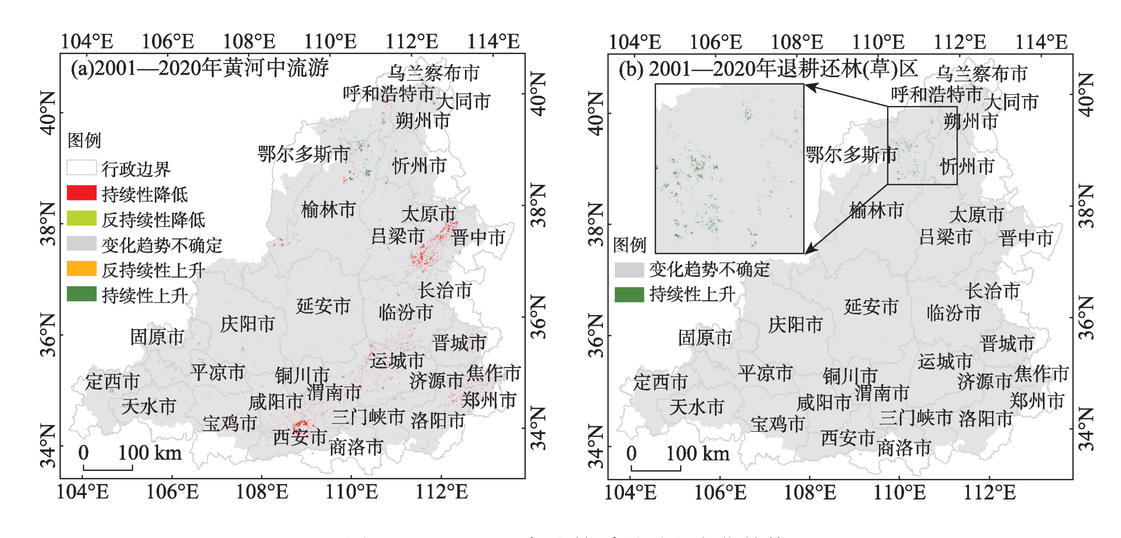


图5　2001—2020年生境质量时空变化趋势

Fig. 5　Spatiotemporal change trend of habitat quality from 2001 to 2020

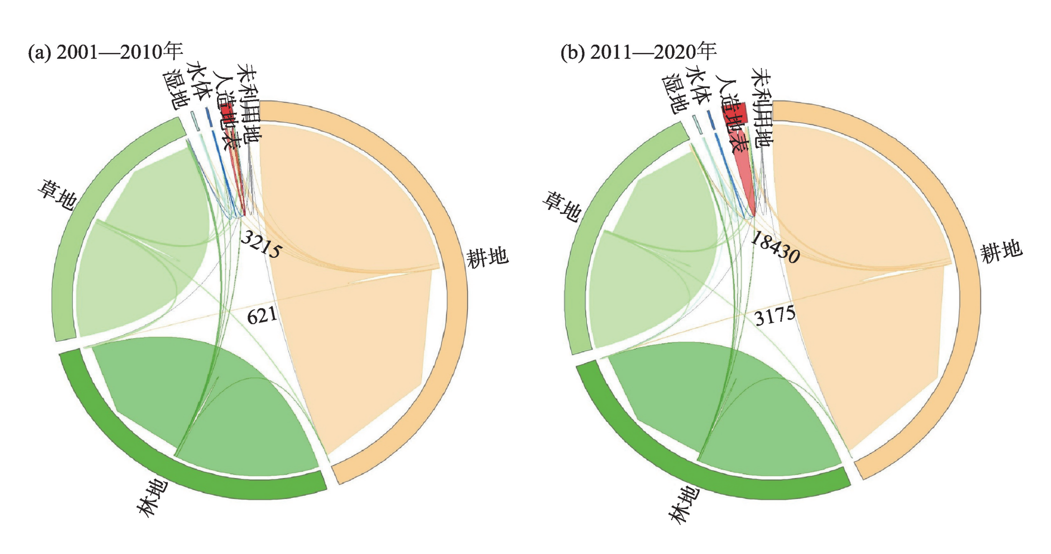


图6 黄河中游不同时期土地利用/覆盖类型转移

Fig. 6 Land use and cover type transfer in the middle reaches of the Yellow River in different periods

生境质量表现为最低等级，但随城镇化发展，原城镇周边区域土地利用/覆盖类型不断向城镇用地转化[35]，生境质量下降地区主要分布在西安、太原等城市及市区周边，究其原因是这些地区交通干线密集、人口密度大[44]，在经济发展过程中土地利用类型不断向城镇用地转化，高强度和不合理的人类活动加剧，引发生境质量退化[45]，这些地区未来需要重点关注。

黄河中游地区正坚定不移走生态优先、绿色发展之路，全面推动退耕还林（草）等生态工程的实施。结合研究结果提出以下几点建议：(1) 生境质量在正向和负向上极易受人类活动的干扰，需针对水源涵养区、水土保持区、湿地保护区以及生态廊道，合理规划布局，使经济社会发展与资源承载力协调发展；(2) 退耕还林（草）能够有效提升生境质量，治理与保护并重切实做好封山禁牧，实施宜林则林、宜草则草的绿化工程；(3) 城市及周边区域生境质量降低，主要是由于在开发利用自然资源时，过于注重短期的经济价值，忽视了生境质量的保护，生境质量的提升与植被状况紧密相关，通过绿化等措施，增加林草植被覆盖度，可有效提高区域生境质量[46]。

本研究在数据上使用了时间分辨率较高的CCI-LC逐年土地覆盖数据，但其空间分辨率有待提升，今后可在Google Earth Engine（GEE）平台，基于Landsat影像解译的30 m土地覆盖数据估算生境质量，提高生境质量评估空间尺度。本研究采用的InVEST模型估算生境质量时，仅考虑了威胁因子对生境的累积胁迫作用，而威胁因子间的交互胁迫作用却未考虑其中，各景观类型对生境威胁因子的敏感度存在人为主观干扰，研究区内部和外部的威胁因子没有得到很好的兼顾。29 a来黄河流域中游地区生境质量整体较为稳定，退耕还林（草）工程实施前，生境质量的时空变化强度较小，但随着生态工程实施和社会经济发展，人类活动持续增强，生境质量在城镇及周边地区表现出聚集扩张式的退化。未来可将黄河中游生境质量时空变化影响机制作为研究重点，定量探测其驱动因素，以期科学有效的提出生态环境保护和恢复的措施。

4 结 论

本文基于黄河中游CCI-LC逐年土地覆盖数据集，依托InVEST模型计算逐年生境质量，运用Sen+MK检验、Hurst指数分析方法，在退耕还林（草）前后探究了1992—2020年黄河中游生境质量的时空变化特征和发展趋势，研究成果将为黄河中游地区开展生态环境保护恢复提供科学指导。具体结论如下：

(1) 近29 a来，黄河中游生境质量呈现微弱波动减小，而在其退耕还林（草）区，生境质量呈现明显增加的趋势，其中在退耕还林（草）工程大规模实施后，生境质量增加迅速。

(2) 黄河中游生境质量时空分布趋势变化的降

低类型所占面积比上升类型要大得多,但随着退耕还林(草)工程的逐步实施,2011—2020年较2001—2010年生境质量呈现上升趋势的面积有所增加。尤其是在退耕还林(草)区,2011—2020年较2001—2010年生境质量上升趋势的面积明显增加,轻微上升和明显上升类型占主导。

(3) 未来黄河中游生境质量以持续性降低和持续性上升发展为主,在退耕还林(草)区生境质量以可持续性上升为主,主要分布在榆林市、忻州市、乌兰察布市、呼和浩特市和鄂尔多斯市等地区。

参考文献(References):

[1] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 12-22. [Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River Basin based on InVEST model and GeoDetector[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 12-22.]

[2] 赵倩倩, 李建华, 张桂琴, 等. 气候变化背景下黄河流域植被变化及其成因[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 157-169. [Zhao Qianqian, Li Jianhua, Zhang Guiqin, et al. Vegetation changes and their causes in the Yellow River Basin under the background of climate change[J]. Climatic and Environmental Research, 2022, 27(1): 157-169.]

[3] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 等. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2005-2020. [Li Yanzhong, Liu Changming, Liu Xiaomang, et al. Impact of the Grain for Green Project on the Land Use/Cover change in the middle Yellow River[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2005-2020.]

[4] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 等. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4538-4548. [Liu Zhifang, Tang Lina, Qiu Quanyi, et al. Temporal and spatial changes in habitat quality based on land-use change in Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4538-4548.]

[5] 赵晓冏, 王建, 苏军德, 等. 基于InVEST模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 301-308. [Zhao Xiaojiong, Wang Jian, Su Junde, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 301-308.]

[6] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 131-147. [Zhao Xueyan, Du Yuxuan, Li Hua, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 131-147.]

[7] Weber D, Schaepman-Strub G, Ecker K. Predicting habitat quality of protected dry grasslands using Landsat NDVI phenology[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 447-460.

[8] Newbold T, Hudson L, Hill S, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J]. Nature, 2015, 520(7545): 45-50.

[9] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of the Total Environment, 2016, 540: 63-70.

[10] 孙彦旭, 周自翔, 米朝娟. 基于土地利用覆被变化(LUCC)的人类活动与流域生物多样性灰色关联分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1782-1792. [Sun Yanxu, Zhou Zixiang, Mi Zhaojuan. Grey correlation analysis of human activities and watershed biodiversity based on land use and cover change[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1782-1792.]

[11] Zhang X, Song W, Lang Y, et al. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality[J]. Land Use Policy, 2020, 99: 104957.

[12] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于InVEST模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2895-2906. [Huang Muyi, Yue Wenze, Feng Shaoru, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui province based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2895-2906.]

[13] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究——以北京为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 553-562. [Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST Model: A case study in Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(3): 553-562.]

[14] 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 等. 基于InVEST模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 139-147. [Yang Zhipeng, Xu Jiawei, Feng Xinghua, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model in Northeast China[J]. Ecological Science, 2018, 37(6): 139-147.]

[15] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3457-3466. [Wu Jiansheng, Cao Qiwen, Shi Shuqin, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area based on land use change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3457-3466.]

[16] 彭建, 吴见, 徐飞雄, 等. 基于价值评估的黄山市生境质量时空演变特征分析[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 665-679. [Peng Jian, Wu Jian, Xu Feixiong, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in typical tourism cities based on value evaluation: A case study of Huangshan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 665-679.]

[17] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质

量时空演变及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3408-3420. [Zhu Zengyun, Alimujiang Ksim. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili Valley based on geographical detector and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3408-3420.]

[18] 王军, 严有龙, 王金满, 等. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848. [Wang Jun, Yan Youlong, Wang Jinman, et al. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5837-5848.]

[19] 李宸宇, 朱建华, 郭学媛, 等. 长江经济带林业生态工程区生境质量时空变化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3788-3799. [Li Chenyu, Zhu Jianhua, Guo Xueyuan, et al. Spatiotemporal variations of habitat quality in forestry ecological project region of the Yangtze River Economic Belt[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(12): 3788-3799.]

[20] 吴林霖, 王思远, 杨瑞霞, 等. 斯里兰卡亚洲象栖息地生境质量时空变化及分异特征[J]. 遥感学报, 2021, 25(12): 2472-2487. [Wu Linlin, Wang Siyuan, Yang Ruixia, et al. Spatio-temporal patterns and differentiations of habitat quality for Asian elephant (*Elephas maximus*) habitat of Sri Lanka[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(12): 2472-2487.]

[21] 钟莉娜, 王军. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 250-255. [Zhong Linna, Wang Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 250-255.]

[22] 王燕, 高吉喜, 金宇, 等. 基于2005—2015年土地利用变化和InVEST模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(5): 654-662. [Wang Yan, Gao Jixi, Jin Yu, et al. Habitat quality of farming-pastoral ecotone in Bairin Right Banner, Inner Mongolia based on land use change and InVEST Model from 2005 to 2015[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(5): 654-662.]

[23] 刘孟竹, 张红娟, 王彦芳, 等. 基于土地利用的北方农牧交错带生境质量研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 156-162. [Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Wang Yanfang, et al. Characteristics of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of northern China based on land uses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 156-162.]

[24] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629. [Bao Yubin, Liu Kang, Li Ting, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model: Taking Yellow River Wetland Nature Reserve in Shaanxi Province as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 622-629.]

[25] 贾艳艳, 王少杰, 刘福胜, 等. 黄河三角洲高效生态经济区土地利用变化及其与生境质量的相关性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 213-220. [Jia Yanyan, Wang Shaojie, Liu Fusheng, et al. Land use change and its correlation with habitat quality in high efficiencyeco- economic zone of Yellow River delta[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 213-220.]

[26] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6134-6145. [Zhou Ting, Chen Wanxu, Li Jiangfeng, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6134-6145.]

[27] 林依雪, 李艳忠, 余文君, 等. 植被恢复工程对黄河中游12个典型流域水热平衡的影响研究[J]. 地理研究, 2020, 39(11): 2593-2606. [Lin Yixue, Li Yanzhong, Yu Wenjun, et al. Quantitative assessment of the impact of the vegetation restoration project on water-energy balance in 12 typical basins of the middle Yellow River[J]. Geographical Research, 2020, 39(11): 2593-2606.]

[28] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460. [Zhao Anzhou, Zhang Anbing, Liu Haixin, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 449-460.]

[29] 王晓峰, 杨丹, 冯晓明, 等. 黄河中游地区生态恢复对流域水资源的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 205-212. [Wang Xiaofeng, Yang Dan, Feng Xiaoming, et al. Impacts of ecological restoration on water resources in middle reaches of Yellow River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 205-212.]

[30] 张镱锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2865-2875. [Zhang Yili, Liu Linshan, Wang Zhaofeng, et al. Spatial and temporal characteristics of land use and cover changes in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2865-2875.]

[31] 李元春, 葛静, 侯蒙京, 等. 基于CCI-LC数据的甘南和川西北地区土地覆盖类型时空动态分布及草地面积变化驱动力研究[J]. 草业学报, 2020, 29(3): 1-15. [Li Yuanchun, Ge Jing, Hou Mengjing, et al. A study of the spatiotemporal dymamic of land cover types and the driving forces of grassland area change in Gannan Prefecture and Northwest Sichuan based on CCI-LC data[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(3): 1-15.]

[32] 程琳琳, 黄婷, 刘焱序. 基于改进价值当量因子的1992-2015年青藏高原生态系统服务价值演化分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 242-248. [Cheng Linlin, Huang Ting, Liu Yanxu. Analysis on evolution of ecosystem service value in Qinghai-Tibet Plateau based on improved value equivalent factors from 1992 to 2015[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 242-248.]

[33] Riedler B, Lang S. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 8-14.

[34] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 979-986. [Xie Yuchu, Gong Jie, Zhang Suxin, et al. Spatiotemporal change of landscape biodiversity based on InVEST Model and remote sensing technology in the Bailong River Watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 979-986.]

[35] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 162-178. [Zhang Xueru, Zhou Jie, Li Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 75(1): 160-178.]

[36] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013年基于GIMMS-NDVI的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208. [Liu Yang, Li Chengzhi, Liu Zhihui, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6198-6208.]

[37] 方利, 王文杰, 蒋卫国, 等. 2000~2014年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2017, 37(11): 1745-1754. [Fang Li, Wang Wenjie, Jiang Weiguo, et al. Spatio-temporal variations of vegetation cover and its responses to climate change in the Heilongjiang Basin of China from 2000 to 2014[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(11): 1745-1754.]

[38] 侯西勇, 应兰兰, 高猛, 等. 1998-2008年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J]. 地理科学, 2010, 30(5): 735-741. [Hou Xiyong, Ying Lanlan, Gao Meng, et al. Character of vegetation cover change in China's eastern coastal areas 1998-2008[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(5): 735-741.]

[39] 国政, 王瑞永. 农民对退耕还林工程建设与管理的满意度分析——基于退耕还林工程实施前后(1980—2017年)典型示范区农户调查数据[J]. 社会科学, 2020, 42(3): 53-67. [Guo Zheng, Wang Ruiyong. Analysis on farmers satisfaction with the construction and management of the grain for green project: Based on the survey daia of iarmers in typical demonstration areas before andafter the implementation of the grain for green project(1980-2017)[J]. Journal of Social Sciences, 2020, 42(3): 53-67.]

[40] Guo S, Wu C, Wang Y, et al. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108603.

[41] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 等. 2001—2020年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 205-212. [Sun Gaopeng, Liu Xianfeng, Wang Xiaohong, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001-2020[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 205-212.]

[42] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 205-212. [Zhao Guangju, Mu Xingmin, Tian Peng, et al. Prediction of vegetation variation and vegetation restoration potential in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 205-212.]

[43] Yin D, Li X, Li G, et al. Spatio-temporal evolution of land use transition and its eco-environmental effects: A case study of the Yellow River Basin, China[J]. Land, 2020, 9(12): 514-514.

[44] Song Y, Wang M, Sun X, et al. Quantitative assessment of the habitat quality dynamics in Yellow River Basin, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(9): 614.

[45] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 1-8. [Fang Chuanglin. Spatial organization pattern and high-quality development of urban agglomeration in the Yellow River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(6): 1-8.]

[46] 陈永国, 刘维军, 荣月静, 等. 基于土地利用与植被覆盖度的大通北川河源区自然保护区生境质量评估[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 332-337. [Chen Yongguo, Liu Weijun, Rong Yuejing, et al. Assessment on habitat quality of Datong Beichuan River source area nature reserve based on land use and vegetation coverage[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 332-337.]

Spatiotemporal changes of habitat quality before and after the implementation of Grain for Green Project in the middle reaches of the Yellow River

CHEN Shi[1], HUANG Yinlan[1], JIN Yunxiang[2]

(1. School of Geography and Planning, Application Research Center of Remote Sensing for Natural Resources, Chizhou University, Chizhou 247000, Anhui, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: It is of great practical significance for the ecological protection, rehabilitation, and high-quality development of the middle reaches of the Yellow River to analyze the spatial and temporal characteristics of habitat quality and its development trend. On the basis of the land cover data of the European Aeronautics and Space Administration from 1992 to 2020, the InVEST model was used to estimate the habitat quality. Sen+MK test and Hurst index analysis methods were applied to explore the spatial and temporal changes and development trends of the habitat quality in the middle reaches of the Yellow River before and after the implementation of the Grain for Green Project. Results showed that the habitat quality in the middle reaches of the Yellow River was good overall in recent 29 years, with the average habitat quality index of 0.652. However, a slight downward trend was observed (a drop of 0.004 per decade). Meanwhile, the habitat quality in the Grain for Green area showed an upward trend (an increase of 0.174 per decade), of which the most significant reached 0.656 recorded from 2011 to 2020. The spatial and temporal changes of habitat quality in the middle reaches of the Yellow River from 2001 to 2020 mainly showed an obvious decrease trend. In terms of the development of different time periods, the area with good habitat quality in 2011−2020 increased compared with that in 2001−2010. This finding was reflected in the improvement of habitat quality in the Grain for Green area. In the future, the temporal and spatial changes of habitat quality in the middle reaches of the Yellow River will be dominated by obvious decrease and obvious increase trends, respectively, and the sustainability will be strong. The significantly reduced areas will be mainly distributed in the Fenwei plain and the urban centralized development areas, and the significantly increased areas will be mainly located in the border areas of Shanxi Province, Shaanxi Province and Inner Mongolia Autonomous Region.

Keywords: habitat quality; InVEST model; the Grain for Green Project; CCI-LC; the Yellow River Basin